

doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2019.12.012

旋转电机驱动的辊弯成形系统的机电动力学模型的优化^①

闫 军^{②*} 李炳震* 周志霞**

(* 内蒙古工业大学机械工程学院 呼和浩特 010051)

(** 内蒙古工业大学电力学院 呼和浩特 010051)

摘 要 本文采用粒子群优化(PSO)算法,以旋转电机转子的角加速度最小值为优化目标,以成形系统机械结构的参数为优化对象。角加速度直接影响系统的稳定运行与产品质量。设定相关变量的取值范围,以机电动力学模型的微分方程为约束条件,建立了成形系统的机电耦联动力学优化模型。优化后的系统机电动力学模型可以更好地指导生产,为实际生产提供理论依据。

关键词 粒子群优化(PSO); 机电耦联; 机电动力学; 优化模型

0 引 言

粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法是随着智能控制而发展起来的,其本质是传统优化方法与人工智能技术相结合的产物^[1,2]。PSO 算法随机产生一个初始种群并赋予每个粒子一个随机速度,在飞行过程中,粒子的速度通过自身以及同伴的飞行经验进行动态调整,整个群体有飞向更好搜索区域的能力^[3,4]。

旋转电机驱动的变截面辊弯成形装备系统的机电动力学包含机械部分和电磁部分,是较强的机电耦合系统^[5]。系统中各个参数的取值决定了整个系统的稳定性与生产效率。为了使成形装备系统能更好、更有效地工作,有必要对系统相关的参数进行优化^[6]。

1 建立优化模型

图 1^[7,8]是单侧成形系统的底面组成示意图,该设备可以加工出左右对称或不对称的零部件。

图 2^[9]为成形系统侧面图,图中显示了系统侧面的组成情况。

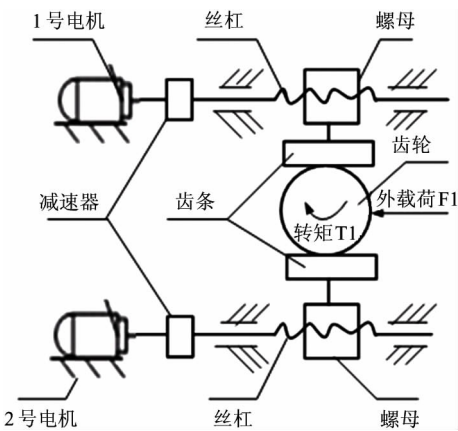


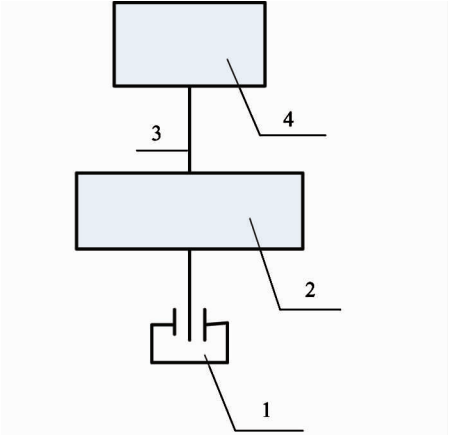
图 1 单侧成形系统底面示意图

加工变截面部件时,轧辊的速度、加速度对整个设备的平稳运行以及加工零部件表面的质量有较大的影响,因此有必要对轧辊的速度、加速度加以控制。选择电机转子的加速度作为优化对象,使电机的运转速度平稳,此时其加速度最小,从而使末端轧辊的运转速度平稳、加速度小,可以提升产品的质量。优化的目的是使系统的各个参数取值更合理,整个系统工作时噪音、振动更小,运行过程更加平稳。

① 国家自然科学基金(51865044),内蒙古自治区自然科学基金(2018LH05039),内蒙古自治区高等学校科学研究(NJZY17096)和内蒙古工业大学科学研究基金(ZD201602)资助项目。

② 男,1974年生,博士,副教授;研究方向:机电动力学;联系人,E-mail: yan_jun11@163.com
(收稿日期:2019-04-26)

— 1269 —



1. 主轴支撑；2. 大齿轮；3. 旋转主轴；4. 小机架

图 2 成形系统侧面组成图

单侧系统的机电动力学模型,如式(1)所示^[9]。

$$\begin{cases} L_{d1} \dot{i}_{d1} + R_{s1} i_{d1} - p L_{q1} i_{q1} \dot{\phi}_1 = u_{d1} \\ L_{q1} \dot{i}_{q1} + R_{s1} i_{q1} + p \cdot L_{d1} i_{d1} \dot{\phi}_1 + p \cdot \psi_{f1} \dot{\phi}_1 = u_{q1} \\ L_{d2} \dot{i}_{d2} + R_{s2} i_{d2} - p L_{q2} i_{q2} \dot{\phi}_2 = u_{d2} \\ L_{q2} \dot{i}_{q2} + R_{s2} i_{q2} + p \cdot L_{d2} i_{d2} \dot{\phi}_2 + p \cdot \psi_{f2} \dot{\phi}_2 = u_{q2} \\ 2J_{t1} \ddot{\phi}_1 + J_{t2} \ddot{\phi}_2 - \frac{3}{2} p [i_{q1} \psi_{f1} + (L_{d1} - L_{q1}) i_{d1} i_{q1}] \\ \quad + B \dot{\phi}_1 = T_0 - \frac{u \cdot F1}{40} + \frac{u \cdot T1}{40R} \\ 2J_{t1} \ddot{\phi}_2 + J_{t2} \ddot{\phi}_1 - \frac{3}{2} p [i_{q2} \psi_{f2} + (L_{d2} - L_{q2}) i_{d2} i_{q2}] \\ \quad + B \dot{\phi}_2 = T_0 - \frac{u \cdot F1}{40} - \frac{u \cdot T1}{40R} \end{cases} \quad (1)$$

令: $X = \max(\ddot{\phi}_1)^2$, $Y = \max(\ddot{\phi}_2)^2$, $\ddot{\phi}_1$ 、 $\ddot{\phi}_2$ 分别为 1、2 号电机的角加速度,构造目标函数为^[8,9]:

$$G(y) = \min(X + Y) \quad (2)$$

其中 y 为设计变量:

$$y = \{R, M_{zzc}, M_{xzt}, J_4, J_5, J_6\}$$

各个参数变量名称见表 1。

式(1)中:

$$\begin{cases} J_{t1} = \frac{1}{2} J_1 + \frac{1}{2} J_2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{400} J_3 + \frac{1}{2} \cdot \frac{u^2}{1600} M \\ \quad + \frac{1}{2} \cdot \frac{u^2}{1600R^2} J + \frac{1}{2} \cdot \frac{u^2}{400} M_1 \\ J_{t2} = M \cdot \frac{u^2}{1600} - J \cdot \frac{u^2}{1600R^2} \end{cases}$$

其中, $M = M_{xzt} + M_{zzc}$ $M_{xzt} = M_2 + M_3 + M_5$

$$J = J_4 + J_5 + J_6$$

丝杠的螺距为 $l = 8 \text{ mm}$, $u = l/(2\pi)$ 。

表 1 为相应参数变量的取值,其中没有给出具体数值的变量为优化对象。

表 1 构件参数表^[9]

零件名称	质量(kg)	转动惯量(kg·m ²)
电机转子	/	0.00017(J_1)
减速器	/	7.6(J_2)
丝杠+联轴器	/	0.007(J_3)
左右丝母座装配体	35.3(M_1)	/
齿轮	M_2	J_4
装齿轮旋转主轴	M_3	J_5
主轴支撑	M_{zzc}	/
小机架	M_5	J_6

2 优化参数

由于系统的机电动力学模型相对复杂,并且耦合性强,选择的优化参数不宜太多。表 2 列出了 6 个待优化的参数及其取值范围^[9,10]。

表 2 设计变量的约束条件

设计变量		齿轮转动惯量	旋转主轴转动惯量
		J_4 (kg·m ²)	J_5 (kg·m ²)
约束条件	最小值	0.20	0.01
	最大值	0.55	0.05
设计变量		分度圆半径	主轴支撑质量
		R (m)	M_{zzc} (kg)
约束条件	最小值	0.05	260.0
	最大值	0.15	340.0
设计变量		小机架转动惯量	旋转装配体质量
		J_6 (kg·m ²)	M_{xzt} (kg)
约束条件	最小值	50.5	320.5
	最大值	60.5	700.5

3 优化过程

PSO 算法优化程序框图如图 3 所示^[11-14]。

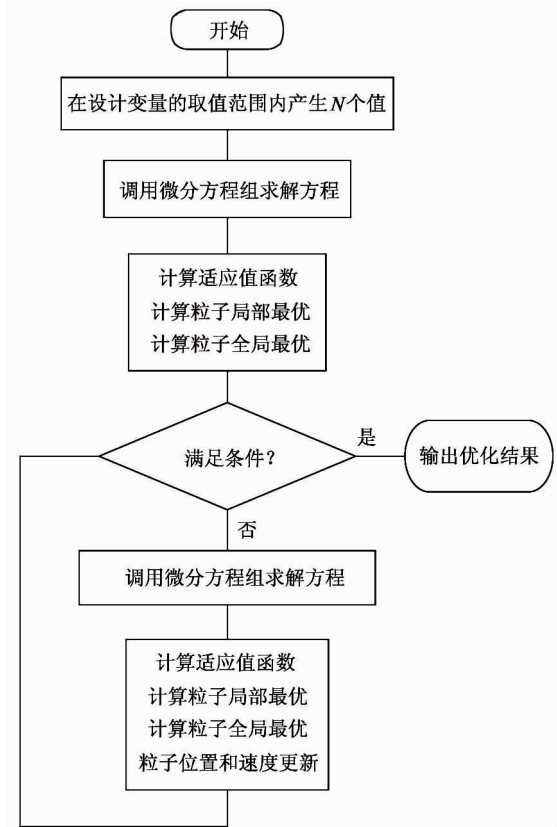


图3 PSO 算法程序框图

粒子数 N 设为 20,最大迭代次数设为 30,进行 10 h 的计算。表 3 列出了前 9 次迭代结果,后面结果与前 9 次略有不同,表中最后一行为最终的优化结果。本文采用了 Matlab 语言优化整个模型,微分方程的求解采用 4 阶龙格库塔法。适应值函数为式(2),局部与全局最优的判定准则为式(2)达到最小值。

4 优化前后系统运动参数曲线图的对比

图 4 是 1 号电机优化前后电磁转矩随时间变化的曲线,虚线是优化后的曲线,实线是优化前的曲线。由图 4 可知,相关系统参数优化后,电机的电磁转矩提高,负载能力提高^[15]。

图 5 是 1 号电机主轴优化前后角位移随时间的变化曲线,虚线是优化后的曲线,实线是优化前的曲线。同等条件下,优化以后电机的角位移增加,电机工作效率提高。

表 3 迭代过程

$G(y)$		R	J_4
0.0437811984985050		0.145949242639290	0.212056128176018
0.0426395645589638		0.144397798067783	0.293732384609425
0.0417602433888065		0.144173355155582	0.242613794713833
0.0417602433888065		0.144173355155582	0.242613794713833
0.0417602433888065		0.144173355155582	0.242613794713833
0.0417602433888065		0.144173355155582	0.242613794713833
0.0413586513140002		0.147690727621788	0.224637976363837
0.0413522960558192		0.147711470181976	0.200000000000000
0.0413522960558192		0.147711470181976	0.200000000000000
0.0408445125082989		0.147361535349508	0.217088581036152
J_5	J_6	M_{zcc}	M_{zst}
0.01895	55.2328884890273	286.969811551911	488.717742514670
0.01680	54.7624951556028	285.163422117183	495.255821371410
0.01000	58.3228631283076	281.178468934537	418.574621184654
0.01000	58.3228631283076	281.178468934537	418.574621184654
0.01000	58.3228631283076	281.178468934537	418.574621184654
0.01000	58.3228631283076	281.178468934537	418.574621184654
0.01000	58.7468366528546	269.678397092448	381.682693382213
0.01000	59.7548517366288	261.802750001924	406.264314038419
0.01000	59.7548517366288	261.802750001924	406.264314038419
0.01000	57.4729204232845	340.000000000000	700.500000000000

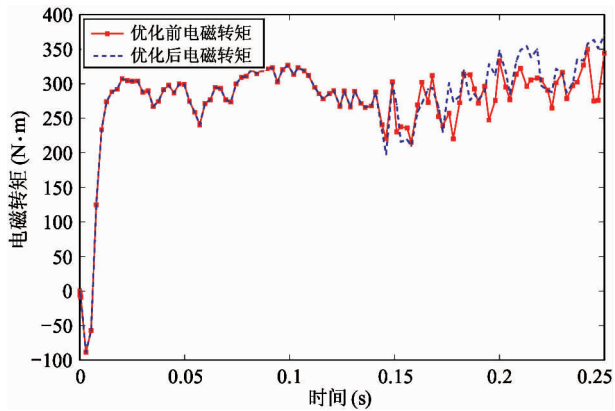


图 4 1 号电机电磁转矩随时间变化图

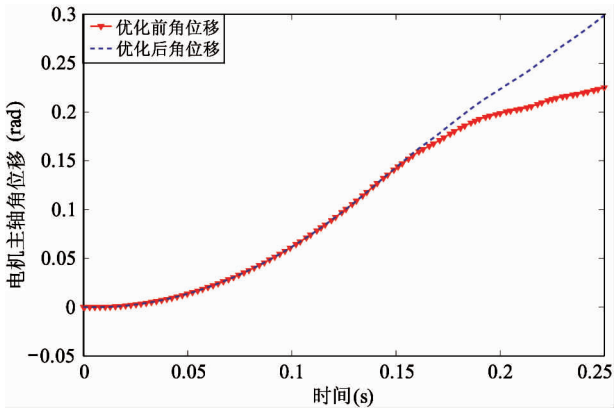


图 5 1 号电机角位移随时间变化图

图 6 是 1 号电机优化前后电机转子的角速度随时间的变化曲线,虚线是优化后的曲线,实线是优化前的曲线。优化以后,电机转子角速度提高,速度波动降低,效率提升,噪音降低,达到了优化目的。

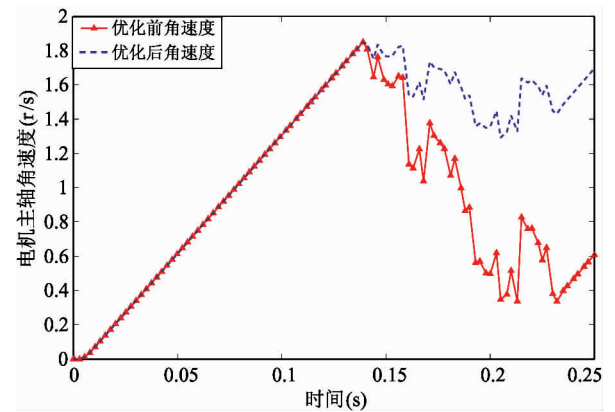


图 6 1 号电机角速度随时间变化图

图 7 是 1 号电机优化前后电机转子的角加速度随时间的变化曲线,虚线是优化后的曲线,实线是优

化前的曲线。优化以后,电机转子角加速度变小,优化前加速度的最大值为 0.52 r/s^2 ,最小值为 -0.51 r/s^2 ;优化后加速度的最大值为 0.35 r/s^2 ,最小值为 -0.33 r/s^2 。角加速度变小说明加工零部件时,各种冲击、噪音减小,产品的质量提高。

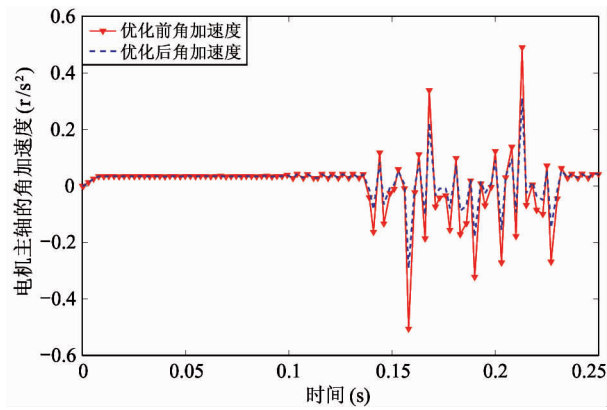


图 7 1 号电机角加速度随时间变化图

5 结 论

电机角加速度的大小直接影响到整个系统是否稳定运行,直接影响加工产品的质量。本文采用 PSO 算法对旋转电机驱动的变截面辊弯成形装备系统的机电动力学模型进行优化,优化了系统中的 6 个变量参数,包括机械参数与电气参数。从优化前后相关参数随时间的变化曲线对比结果可知,本文优化方法较为合理,达到了预期的目的,对生产实践有一定的指导意义。

参考文献

[1] 施光燕,董加礼. 最优化方法[M]. 北京:高等教育出版社,1999: 1-50

[2] 陈华,杨帆,刘刚. 基于群智能优化算法的医学图像分割综述[J]. 高技术通讯,2019,29(5):512-522

[3] 胡鑫楠. 基于改进型混沌粒子群优化算法的 FIR 高通数字滤波器设计[J]. 计算机科学, 2019,46(6A): 601-604

[4] Na R S, Li Q, Wu L J. An improved particle swarm optimization algorithm[C] // Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Engineering Materials and Technology(AEMT 2012), Zhuhai, China, 2012: 2658-2661

- [5] 唐超,刘惠康,曹宇轩,等. 基于鸟群算法优化的桥式吊车线性自抗扰控制[J]. 高技术通讯, 2019,29(4): 371-378
- [6] 金滔,董秀成,李亦宁,等. 改进的粒子群优化算法优化分数阶 PID 控制器参数[J]. 计算机应用,2019, 39(3): 796-801
- [7] 闫军,李强,武建新. 变截面辊弯成型装备的机电动力学分析及其系统控制仿真[J]. 机械设计与制造, 2014,4: 79-83
- [8] Yan J, Li Q, Wu J X. Electromechanical dynamics analysis and simulation on roll-forming equipment based on linear motor[J]. *International Journal of Modelling and Simulation*, 2014, 34(3): 126-133
- [9] Yan J, Li Q, Zhou Z X. Electromechanical dynamics analysis and simulation on rollforming equipment with both sides variable cross-section[J]. *High Technology Letters*, 2016, 22(1):75-81
- [10] 刘伟,周育人. 一种改进惯性权重的 PSO 算法[J]. 计算机工程与应用,2009,45(7):46-48
- [11] Li Q, Wu J X, Sun Y. Dynamic optimization method on electromechanical coupling system by exponential inertia weight particle swarm algorithm[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 22(4):602-607
- [12] 汪在荣,张文凤. 一种基于成对粒子的粒子群优化算法[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2018,41(6):840-845
- [13] 钱亚冠,卢红波,纪守领,等. 基于粒子群优化的对抗样本生成算法[J]. 电子与信息学报,2019,41(7): 1658-1664
- [14] 黄婉平. 自适应粒子群优化算法及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学信息学院, 2006: 1-50
- [15] 闫军,姚代祯,周志霞. 电力机车机电动力学模型的构建与分析[J]. 高技术通讯,2019,29(6):602-606

Optimization of electromechanical dynamic model of motor driven roll-forming equipment

Yan Jun^{*}, Li Bingzhen^{*}, Zhou Zhixia^{**}

(^{*} College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051)

(^{**} College of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051)

Abstract

Particle swarm optimization (PSO) algorithm is used in this work. The minimum angle acceleration of motor rotor is taken as the final goal of optimization, taking the parameters of mechanical structure and electrical parameters as the optimization object. Angular acceleration directly affects the stable motion of the system and product quality. Setting the value range of the related variable and taking the differential equation of electromechanical dynamics model as constraints, the optimization model of electromechanical coupling dynamics based on forming system is established. The optimized electromechanical dynamics model is used to guide the production practice better, and the theoretical basis for production practice of the system is provided.

Key words: particle swarm optimization (PSO), electromechanical coupling, electromechanical dynamic, optimization model